

ENERGETSKE ZAJEDNICE I DIJELJENJE ENERGIJE

Goran KNEŽEVIĆ

Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Kneza Trpimira 2b, Osijek, Hrvatska
goran.knezevic@ferit.hr

Danijel TOPIĆ

Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Kneza Trpimira 2b, Osijek, Hrvatska
danijel.topic@ferit.hr

Nemanja MIŠLJENOVIC

Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Kneza Trpimira 2b, Osijek, Hrvatska
nemanja.misljenovic@ferit.hr

Sažetak

Dosadašnji pasivni kupci električne energije integracijom elektrana na obnovljive izvore energije (OIE) u njihovu vlasništvu postaju kupci s vlastitom proizvodnjom, odnosno postaju aktivni kupci. Proizvodnja električne energije iz većine elektrana na OIE uglavnom je promjenjiva i uzrokuje teškoće u planiranju pogona elektroenergetskog sustava aktivnog kupca. Veća fleksibilnost pogona može se postići dodavanjem stacionarnog sustava za pohranu električne energije ili uporabom baterije električnog vozila. Optimizacijom pogona energetskog sustava aktivnog kupca uz integraciju električnog vozila kao upravljivog elementa nastoji se omogućiti smanjenje troškova aktivnog kupca zadržavajući zadovoljavajuću razinu komfora. Uz to, smanjuju se nesigurnost predviđanja proizvodnje električne energije iz elektrane na OIE koja je u vlasništvu aktivnog kupca i predviđanja potrošnje elektroenergetskog sustava aktivnog kupca. Dodatnu mogućnost za smanjenjem troškova aktivni kupci mogu ostvariti osnivanjem energetskih zajednica koje predstavljaju novi koncept koji potiče aktivne kupce na suradnju omogućavajući time zajedničku uporabu energetskih usluga kao što su proizvodnja, potrošnja i pohrana energije. Uz ostvarivanje financijske dobiti ciljevi osnivanja energetskih zajednica također su okolišna i socijalna korist za članove zajednice ili lokalna područja na kojima zajednica djeluje. Hrvatsko zakonodavstvo definira dva osnovna tipa energetskih zajednica: energetske zajednice građana (EZG) i zajednice obnovljivih izvora energije (ZOIE). ZOIE se usredotočuje na širenje i lokalnu uporabu obnovljivih izvora električne i toplinske energije, dok se EZG-ovi fokusiraju na uspostavljanje novog sudionika na tržištu električne energije i pružanje šireg spektra usluga u odnosu na ZOIE. U radu se analizira optimalno

upravljanje energetske sustavom aktivnog kupca koji posjeduje električno vozilo i fotonaponsku elektranu s ciljem minimizacije troška aktivnog kupca koji se odnosi na plaćanje mjesečnog računa za električnu energiju. Također, razmatra se dobrobit aktivnog kupca u slučaju formiranja energetske zajednice i razmjene energije unutar zajednice. Uz to, analizira se i dobrobit formiranja lokalnog tržišta na kojemu više energetskih zajednica može međusobno trgovati električnom energijom. Nadalje, analizira se i utjecaj energetskih zajednica na ugljični otisak (engl. carbon footprint) aktivnog kupca.

Ključne riječi: aktivni kupci, energetske zajednice, dijeljenje energije, optimalno upravljanje energetske sustavom, ugljični otisak

Ključna poruka rada: U radu se analizira optimalno upravljanje energetske sustavom aktivnog kupca koji posjeduje električno vozilo i fotonaponsku elektranu s ciljem minimizacije troška koji se odnosi na plaćanje mjesečnog računa za električnu energiju. Također, razmatra se dobrobit aktivnog kupca u slučaju formiranja energetske zajednice i razmjene energije unutar zajednice.

1. Uvod

Kako bi se zadovoljile rastuće potrebe za električnom energijom te istovremeno utjecalo na razine emisija stakleničkih plinova, neophodno je osigurati održivu proizvodnju električne energije. Održiva proizvodnja električne energije proizlazi iz integracije elektrana na obnovljive izvore energije. Osim održive proizvodnje električne energije, važno je osigurati i transportni sektor održivim jer transportni sektor također posjeduje velik utjecaj na emisije. Iz navedenog slijedi da je potrebno osigurati i poticati elektrifikaciju transportnog sektora, odnosno zamjenu konvencionalnih vozila s električnim vozilima. Sve navedeno je potrebno postići u cilju dostizanja ciljeva Europske Komisije za smanjenje stakleničkih plinova (Climate Action, 2014; 2050 long-term strategy, 2020).

Provedena istraživanja pokazuju da je optimalno smjestiti distribuiranu proizvodnju, odnosno elektrane na obnovljive izvore energije blizu potrošača električne energije. Smještajem distribuirane proizvodnje blizu potrošača električne energije, smanjuju se gubici prilikom prijenosa električne energije kao i ukupni gubici u sustav. S obzirom na navedeno, distribuiranu proizvodnju potrebno je smjestiti blizu potrošača, odnosno u distribucijsku mrežu. Integracijom elektrana na obnovljive izvore energije, do sada pasivni kupci električne energije postaju aktivni kupci, što znači da osim preuzimanja električne energije iz mreže mogu predavati električnu energiju u mrežu. Problemi koji nastaju integracijom elektrana na obnovljive izvore energije u distribucijsku mrežu su naponska povišenja na mjestu spoja, utjecaj na struje kratkog spoja te utjecaj na tokove snaga (energije), što može dovesti do preopterećenja komponenata u sustavu. Osim

navedenih problema, aktivni kupci imaju probleme prilikom nastupa na pojedinim tržištima električne energije te s upravljanjem električnom energijom zbog relativno niskih instaliranih snaga elektrana te nemogućnosti upravljanja proizvodnjom, naročito ako elektrane na obnovljive izvore za proizvodnju električne energije koriste energiju sunaca ili vjetra. U cilju smanjenja utjecaja navedenih problema, neophodno je osigurati određen stupanj fleksibilnosti aktivnog kupca. Fleksibilnost se može osigurati ugradnjom sustava za pohranu energije. Sustavi pohrane električne energije koji pokazuju potencijal za primjenu kod aktivnih kupaca su elektrokemijski sustavi pohrane energije, odnosno sekundarne baterije te kemijski sustavi pohrane energije, odnosno gorive ćelije. U ovom radu će se pozornost usmjeriti na baterijske sustave energije, točnije baterije električnih vozila jer električna vozila mogu pružati uslugu fleksibilnosti u sustavu te se mogu koristiti za transport. Primjenom naprednih usluga kao što je tzv. *vehicle-to-grid* usluga, odnosno mogućnost razmijene električne energije između električnog vozila i mreže, električna vozila omogućuju pružanje usluge fleksibilnosti sustavu. S obzirom na navedeno, primijećen je veći broj znanstvenih radova s kojima se nastoje riješiti navedeni problemi te unaprijediti već postojeća rješenja (Mišljenović i sur., 2023).

Kako je već prethodno objašnjeno, sustav upravljanja energijom je važna komponenta aktivnog kupca te je u nastavku dan pregled znanstvenih radova u kojima autori razvijaju navedene modele. U cilju osiguravanja ušteda i komfora korisnika kućanstva, Hou i suradnici (2019) predlažu optimizacijski model realiziran pomoću mješovitog cjelobrojnog linearnog programiranja (engl. *mixed integer linear programming*). Također, autori se slažu da je sustav upravljanja energijom neophodna komponenta koju moraju posjedovati aktivni kupci u cilju donošenja optimalnih upravljačkih odluka za uređaje u kućanstvu, obnovljive izvore energije, sustave pohrane energije i električna vozila. Nadalje, Mišljenović i suradnici (2022) istraživali su kako različiti načini punjenja baterije električnog vozila utječu na osiguravanje ušteda aktivnog kupca u tržišnom okruženju i predlažu optimizacijski model realiziran pomoću mješovitog cjelobrojnog linearnog programiranja. Istraživanjem, autori su zaključili da se dodatne uštede mogu postići osiguravanjem snage punjenja baterije električnog vozila u punom opsegu, odnosno da se može odabrati bilo koji iznos snage punjenja od minimalne do maksimalne vrijednosti. Tržišni model punjenja i pražnjenja baterija električnih vozila na parkingu komercijalne zgrade predstavili su Mišljenović, Knežević i Pleskalt (2023). Predloženim modelom nastoje se osigurati koristi i za vlasnike električnih vozila i za komercijalnu zgradu. Nadalje, predloženi model razvijen je u GAMS programskom okruženju pomoću mješovitog cjelobrojnog linearnog programiranja s ciljem maksimiziranja ukupne društvene dobrobiti.

Nadalje, aktivni kupci mogu formirati energetske zajednice i nastupati zajednički na različitim tržištima električne energije kako bi osigurali veće uštede i ujedno smanjili povratan utjecaj na mrežu. U nastavku su prikazani znanstveni radovi u kojima autori razvijaju modele sustava upravljanja energijom prilikom udruživanja aktivnih kupaca.

Lokeshgupta i Sivasubramani (2018) predlažu višeciljni sustav upravljanja energijom formuliran na osnovu cjelobrojnog linearnog programiranja. Predloženim sustavom upravljanja energijom nastoji se postići smanjenje troška i utjecaj na mrežu. Autori zanemaruju mogućnost nastupa na lokalnom tržištu energije, ali integriraju upravljanje potražnjom. Nadalje, autori analiziraju troškove aktivnih kupaca ako nastupaju samostalno i ako se udružuju. Iz analize rezultata proizlazi da ako raste broj aktivnih kupaca, tvrtke će poboljšati svoje koristi kao i profile opterećenja. Zhong i suradnici (2018) predložili su iskorištavanje baterije električnog vozila na više lokacija, ali bez integracije lokalnog tržišta električne energije. Funkcija cilja je minimizacija troška električne energije na više lokacija, odnosno istodobno minimiziranje troškova kućanstva i radnog mjesta. Rezultati pokazuju mogućnost smanjenja troška svih uključenih članova uz osiguravanje zadovoljstva korisnika i bez potrebe za pomicanjem potražnje električne energije.

Formiranje energetske zajednice omogućava aktivnim kupcima trgovanje električnom energijom na lokalnom tržištu u cilju osiguravanja ušteda i smanjenja utjecaja na mrežu. Primjeri znanstvenih radova u kojima autori prilikom razvoja modela sustava upravljanja energijom uzimaju u obzir mogućnost trgovanja električnom energijom na lokalnom tržištu prikazani su u nastavku. Saif i suradnici (2023) razvili su tržište električne energije zajednice temeljeno na osiguravanju tzv. *peer-to-peer* transakcija. Predloženi model osigurava uštede od 50% tijekom ljetnih mjeseci te 36,6% tijekom zimskih mjeseci s pojačanom potrošnjom električne energije lokalno od dodatnih 31% tijekom ljetnih mjeseci. Al-Sorour i suradnici (2023) tvrde da tzv. *peer-to-peer* trgovanje predstavlja efektivni pristup za upravljanje obnovljivim izvorima energije, električnim vozilima kao i jedno od tržišnih rješenja. Shodno navedenom, autori predlažu optimizacijski model realiziran pomoću mješovito cjelobrojnog linearnog programiranja za osiguravanje optimalnog upravljanja energijom kućanstava unutar energetske zajednice. Primjenjujući uslugu razmijene električne energije između električnog vozila i kućanstva (engl. *vehicle-to-home*), smanjenje troška svakog aktivnog kupca iznosi 23% i energetske zajednice za 15% u usporedbi bez primjene spomenute usluge. Također, ukupna neto razmjena energije između zajednice i mreže smanjena je za 3%. Faia i suradnici (2021) slažu se da koncept lokalnog tržišta električne energije može osigurati bržu integraciju električnih vozila. S obzirom na navedeno, autori predlažu optimizacijski model razvijen pomoću mješovitog cjelobrojnog linearnog programiranja koji omogućava trgovanje električnom energijom između aktivnih kupaca unutar energetske zajednice i električnih vozila (engl. *peer-to-vehicle*). Rezultati pokazuju osiguravanje ušteda s predloženim modelom od 1,6% do 3,5% u usporedbi bez predloženog modela, odnosno mogućnosti razmjene energije između aktivnih kupaca i električnih vozila.

Pregledom literature, može se zaključiti važnost razvoja sustava upravljanja energijom aktivnog kupca jer je gotovo nemoguće donositi optimalne odluke bez primjene istog. Mišljenović i suradnici (2024) istraživali su utjecaj lokalnog tržišta električne energije unutar energetske zajednice na vrijednost funkcije cilja i emisije te se i ovo istraživanje

oslanja na navedeni rad u cilju proširenja postojećih i ostvarivanja novih saznanja. U ovom radu predlaže se optimizacijski model sustava za optimalno upravljanje energijom aktivnog kupca odnosno energetske zajednice u cilju rješavanja problem optimalnog upravljanja električnom energijom aktivnih kupca koji posjeduju fotonaponske elektranu i električna vozila u tržišnim uvjetima.

Nakon uvodnog dijela, u 2. poglavlju predstavljene su energetske zajednice uzimajući u obzir direktive Europske unije i Zakon o tržištu električne energije u Republici Hrvatskoj. U 3. poglavlju predložen je optimizacijski model sustava za kratkoročno upravljanje energijom aktivnog kupca odnosno unutar energetske zajednice. Provedeni simulacijski scenariji i korišteni ulazni podaci opisani su u 4. poglavlju. U 5. poglavlju prikazani su i analizirani rezultati dobiveni predloženim optimizacijskim modelom sustava za kratkoročno upravljanje energijom aktivnog kupca odnosno unutar energetske zajednice. U zadnjem poglavlju dan je zaključak rada uzimajući u obzir dobivene rezultata provedenih simulacijskih scenarija.

2. Energetske zajednice građana

U odredbe Europske unije o uređenju energetskog tržišta i okvirima za nove energetske inicijative spadaju:

- ▶ Zajednice obnovljivih izvora energije - Direktiva (EU) 2019/944 i
- ▶ Energetske zajednice građana - Direktiva (EU) 2018/2001.

Zajednice obnovljivih izvora energije se usredotočuje na širenje i lokalnu uporabu obnovljivih izvora električne i toplinske energije, dok se energetske zajednice građana fokusiraju na uspostavljanje novog sudionika na tržištu električne energije i pružanje šireg spektra usluga u odnosu na zajednica obnovljivih izvora energije.

Nadalje, energetske zajednice građana su pokrivene:

- ▶ Europskom direktivom o zajedničkim pravilima za unutarnje tržište električne energije (Direktiva (EU) 2019/944) (Directive (EU) 2019/944, 2019) i
- ▶ Zakonom o tržištu električne energije u Republici Hrvatskoj (Zakon o tržištu električne energije, 2021).

Europska direktiva postavlja smjernice za proizvodnju, prijenos, distribuciju, opskrbu i skladištenje električne energije, uzimajući u obzir zaštitu potrošača, s ciljem stvaranja integriranih, konkurentnih, fleksibilnih, pravednih i transparentnih tržišta električne energije unutar Europske unije, usmjerenih na potrebe građana. Pravila koja se odnose na maloprodajna tržišta električne energije definirana su u Direktivi 2019/944, dok se regulacija veleprodajnog tržišta i rad mreže obuhvaća Uredbom 2019/943.

Energetske zajednice građana su prema Direktivi 2019/944 definirane na način:

- ▶ *“Jesu subjekti pod kontrolom vlasnika udjela ili članova zasnovani na dobrovoljnom i otvorenom sudjelovanju, koji imaju pravo sudjelovati u proizvodnji, distribuciji, opskrbi, potrošnji, uslugama energetske učinkovitosti ili uslugama punjenja za električna vozila ili pružaju druge energetske usluge svojim članovima ili vlasnicima udjela;*
- ▶ *Imaju pravo biti priključene na distribucijske mreže i tretirane na nediskriminirajući način u smislu regulacije ili pristupa svim tržištima električne energije;*
- ▶ *Imaju pravo dijeliti vlastitu proizvodnju električne energije sa svojim članovima u skladu analizom troškova i koristi distribuiranih energetskih izvora;*
- ▶ *Imaju pravo, ako to dotična zemlja EU-a dopušta, posjedovati, uspostavljati, kupovati ili iznajmljivati distribucijske mreže u skladu s primjenjivim propisima.*
“

Prema Direktivi 2019/944 također stoji da operatori distribucijskog sustava “odgovorni su za osiguranje dugoročne sposobnosti sustava da udovolji zahtjevima za distribuciju električne energije, uključujući troškovno učinkovitu integraciju novih postrojenja za proizvodnju električne energije, posebno onih koja proizvode električnu energiju iz obnovljivih izvora, kao i za pružanje korisnicima sustava informacija potrebnih za učinkovit pristup i upotrebu sustava”.

S obzirom da je Republika Hrvatska članica Europske unije, Zakon o tržištu električne energije u Republici Hrvatskoj preuzima Direktivu 2019/944 koja proizlazi iz paketa „Čista energija za sve Europljane“ (engl. *Clean energy for all Europeans package*).

Nadalje, prema Zakonu o tržištu električne energije u Republici Hrvatskoj, Energetska zajednica građana je “pravna osoba koja se temelji na dobrovoljnom i otvorenom sudjelovanju te je pod stvarnom kontrolom članova ili vlasnika udjela koji su fizičke osobe, jedinice lokalne samouprave ili mala poduzeća, a čija je primarna svrha pružanje okolišne, gospodarske ili socijalne koristi svojim članovima ili vlasnicima udjela ili lokalnim područjima na kojima djeluje, a ne stvaranje financijske dobiti i koja može sudjelovati u proizvodnji, među ostalim iz obnovljivih izvora, opskrbi, potrošnji, agregiranju, skladištenju energije, uslugama energetske učinkovitosti ili uslugama punjenja za električna vozila ili pružati druge energetske usluge svojim članovima ili vlasnicima udjela”.

U prvobitnom Zakonu o tržištu električne energije u Republici Hrvatskoj definiran je uvjet da za formiranje energetske zajednice građana, svi članovi zajednice moraju biti priključeni na istu transformatorsku stanicu. U kasnijim izmjenama Zakona o tržištu električne energije, navedeni uvjet je uklonjen.

Nadalje, važna pravila koja proizlaze iz Zakona o tržištu električne energije u Republici Hrvatskoj su:

- ▶ *“Na obračunskom mjernom mjestu vlasnika udjela odnosno člana energetske zajednice građana vrijede prava i obveze krajnjeg kupca ili aktivnog kupca odnosno korisnika mreže;*
- ▶ *Na obračunskom mjernom mjestu vlasnika udjela ili člana energetske zajednice građana primjenjuju se tarifne stavke za prijenos električne energije u skladu s metodologijom za određivanje iznosa tarifnih stavki za prijenos električne energije i odlukom o iznosu tarifnih stavki za prijenos električne energije te tarifne stavke za distribuciju električne energije u skladu s metodologijom za određivanje iznosa tarifnih stavki za distribuciju električne energije i odlukom o iznosu tarifnih stavki za distribuciju električne energije;*
- ▶ *Na obračunskom mjernom mjestu vlasnika udjela odnosno člana energetske zajednice zasebno se razmatra i uzima u obzir električna energija koja je predana u mrežu i električna energija koja je preuzeta iz mreže, u skladu sa zakonom kojim se uređuje energetski sektor i zakonom kojim se uređuje područje regulacije energetskih djelatnosti, te člankom 18. Uredbe (EU) 2019/943 osiguravajući odgovarajući i uravnotežen doprinos raspodjeli ukupnih troškova sustav;*
- ▶ *Energetska zajednica građana može sudjelovati na svim tržištima električne energije izravno ili putem agregiranja u skladu s pravilima kojima se uređuju pojedina tržišta električne energije;*
- ▶ *Energetska zajednica građana ima pravo na obračunskim mjernim mjestima vlasnika udjela i članova energetske zajednice urediti dijeljenje električne energije iz proizvodnih postrojenja i postrojenja za skladištenje energije energetske zajednice građana ili aktivnog kupca koji je član energetske zajednice građana u skladu s općim uvjetima za korištenje mreže i opskrbu električnom energijom dok se na obračunskim mjernim mjestima vlasnika udjela i članova energetske zajednice građana zadržavaju prava i obveze krajnjih kupaca odnosno korisnika mreže. “*

Ako energetska zajednica sudjeluje na veleprodajnom tržištu, snosi financijsku odgovornost za odstupanja koja uzrokuje u elektroenergetskom sustavu. Prilikom dijeljenja električne energije, zadržava se obveza plaćanja naknade za korištenje distribucijske mreže i drugih propisanih davanja. Hrvatska energetska regulatorna agencija (HERA) provodi analizu troškova i koristi distribuiranih izvora električne energije. U svrhu dijeljenja energije, energetska zajednica mora dostaviti operatoru distribucijskog sustava popis obračunskih mjernih mjesta svojih članova uključenih u dijeljenje, kao i ključ raspodjele električne energije među tim mjestima. Sva obračunska mjesta trebaju biti opremljena naprednim

brojilima i ispunjavati tehničke zahtjeve propisane mrežnim pravilima distribucijskog sustava. Dodatno, ukupna priključna snaga u smjeru predaje električne energije u mrežu ne smije prelaziti ukupnu snagu u smjeru preuzimanje električne energije iz mreže. Višak proizvedene električne energije, koji nije iskorišten unutar zajednice, preuzima opskrbljivač na obračunskom mjernom mjestu člana zajednice koji sudjeluje u dijeljenju.

Nadalje, članovi energetske zajednice mogu razmjenjivati električnu energiju, pri čemu imaju mogućnost kupovati potrebnu energiju od drugih članova, primjerice višak iz fotonaponskih elektrana, ili iz proizvodnih postrojenja po povoljnijim cijenama u usporedbi s cijenom električne energije iz mreže. Koliko će ta cijena biti povoljnija ovisi o brojnim čimbenicima, uključujući investicije u projekte (bilo zajedničke ili privatne), naknade za korištenje distribucijske mreže, poreze, kao i razvoj lokalnog tržišta električne energije. Također, članovima zajednice je isplativije prodavati električnu energiju na lokalnom tržištu, budući da se mogu ostvariti veće cijene u usporedbi s prodajom viškova energije u mrežu. Uz ekonomske koristi za članove zajednice, Faia i suradnici (2021) slažu se da lokalno tržište može doprinijeti i boljoj integraciji električnih vozila.

3. Matematički model

U ovom poglavlju predstaviti će se predložen optimizacijski model sustava za kratkoročno upravljanje energijom aktivnog kupca odnosno unutar energetske zajednice. Predloženi optimizacijski model sastoji se od funkcije cilja i pripadajućih ograničenja. Funkcija cilja je minimizacija troška rada aktivnog kupca odnosno energetske zajednice uzimajući indirektno utjecaj energetskih zajednica na ugljični otisak aktivnog kupca. Predloženi optimizacijski model sustava za kratkoročno upravljanje energijom realiziran je pomoću mješovitog cjelobrojnog linearnog programiranja u GAMS programskom okruženju.

Funkcija cilja predloženog optimizacijskog modela sustava za kratkoročno upravljanje energijom aktivnog kupca odnosno unutar energetske zajednice može se zapisati:

- ▶ minimiziraj {trošak električne energije kupljene iz mreže – zarada od prodane električne energije u mrežu + trošak dijeljenja električne energije unutar energetske zajednice – zarada od dijeljenja električne energije unutar energetske zajednice}

Kako se optimizacijski model sastoji od funkcije cilja i pripadajućih ograničenja, ograničenja predloženog optimizacijskog modela sustava za kratkoročno upravljanje energijom aktivnog kupca odnosno unutar energetske zajednice su:

- ▶ jednadžba balansa snage,
- ▶ stanje napunjenosti baterije električnog vozila,

- ▶ ograničenje vršne snage prilikom uvoza električne energije iz mreže,
- ▶ ograničenje vršne snage prilikom izvoza električne energije u mreže,
- ▶ ograničenje vršne snage prilikom uvoza električne energije s lokalnog tržišta električne energije,
- ▶ ograničenje vršne snage prilikom izvoza električne energije na lokalno tržište električne energije,
- ▶ ograničenje vršne snage prilikom punjenja baterije električnog vozila,
- ▶ ograničenje vršne snage prilikom pražnjenja baterije električnog vozila.

Matematička formulacija predloženog optimizacijskog modela sustava za kratkoročno upravljanje energijom opisana je u nastavku.

Funkcija cilja predloženog optimizacijskog modela definirana je pomoću izraza (1):

$$\min \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \left\{ \left(\frac{Pimp_{p,t}}{dt} \cdot pimp_{p,t} - \left(\frac{Pexp_{p,t}}{dt} \right) \cdot pexp_{p,t} \right) + \left(\frac{Plimp_{p,t}}{dt} \cdot plem_t - \left(\frac{Plexp_{p,t}}{dt} \right) \cdot plem_t \right) \right\} \quad (1)$$

gdje su:

- $Pimp_{p,t}$ – snaga prilikom uvoza električne energije iz mreže u vremenskom trenutku t ,
- $Pexp_{p,t}$ – snaga prilikom izvoza električne energije u mrežu u vremenskom trenutku t ,
- $pimp_{p,t}$ – cijena za uvoz električne energije iz mreže u vremenskom trenutku t ,
- $pexp_{p,t}$ – cijena za izvoz električne energije u mrežu u vremenskom trenutku t ,
- $Plimp_{p,t}$ – snaga prilikom preuzimanja električne energije s lokalnog tržišta u vremenskom trenutku t ,
- $Plexp_{p,t}$ – snaga prilikom predaje električne energije na lokalno tržište u vremenskom trenutku t ,
- $plem_t$ – cijena električne energije na lokalnom tržištu u vremenskom trenutku t ,
- dt – koeficijent ovisan o vremenskom koraku t .

Ograničenje (2) osigurava da je potrošnja jednaka proizvodnji električne energije, odnosno definira jednadžbu balansa snage:

$$\begin{aligned}
 & Pd_{p,t} - Ppv_{p,t} + \sum_{ev=1}^{EV} Pchev_{p,ev,t} - \sum_{ev=1}^{EV} Pdchev_{p,ev,t} \\
 & = Pimp_{p,t} - Pexp_{p,t} + Plimp_{p,t} - Plexp_{p,t}
 \end{aligned} \quad (2)$$

gdje su:

$Pd_{p,t}$	–	snaga prilikom preuzimanje električne energije iz mreže u vremenskom trenutku t ,
$Ppv_{p,t}$	–	snaga prilikom proizvodnje električne energije iz fotonaponske elektrane u vremenskom trenutku t ,
$Pchev_{p,ev,t}$	–	snaga potrebna za punjenje baterije električnog vozila u vremenskom trenutku t ,
$Pdchev_{p,ev,t}$	–	snaga dobivena pražnjenjem baterije električnog vozila u vremenskom trenutku t .

Procjena stanja napunjenosti baterije električnog vozila definirana je pomoć izraza (3) za prvi vremenski trenutak ($t = 1$) i za svaki sljedeći vremenski trenutak ($t > 1$) pomoću izraza (4):

$$\begin{aligned}
 & SOCEv_{p,ev,t} = SOCEv_{p,ev,start} \\
 & + \eta ch \cdot \left(\frac{Pchev_{p,ev,t}}{dt} \right) - \frac{1}{\eta dch} \cdot \left(\frac{Pdchev_{p,ev,t}}{dt} \right)
 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 & SOCEv_{p,ev,t} = SOCEv_{p,ev,t-1} \\
 & + \eta ch \cdot \left(\frac{Pchev_{p,ev,t}}{dt} \right) - \frac{1}{\eta dch} \cdot \left(\frac{Pdchev_{p,ev,t}}{dt} \right)
 \end{aligned} \quad (4)$$

gdje su:

$SOCEv_{p,ev,t}$	–	stanje napunjenosti baterije električnog vozila u vremenskom trenutku t ,
$SOCEv_{p,ev,start}$	–	stanje napunjenosti baterije električnog vozila na početku perioda planiranja,
ηch	–	učinkovitost punjenja baterije električnog vozila,
ηdch	–	učinkovitost pražnjenja baterije električnog vozila.

Ograničenja snage prilikom uvoza električne energije iz mreže i s lokalnog tržišta te izvoza električne energije u mrežu i na lokalno tržište definirana su izrazima (5) – (8):



$$0 \leq P_{imp_{p,t}} \leq P_{imp_{p,max}} \cdot B_{imp_{p,t}} \quad (5)$$

$$0 \leq P_{exp_{p,t}} \leq P_{exp_{p,max}} \cdot B_{exp_{p,t}} \quad (6)$$

$$0 \leq P_{limp_{p,t}} \leq P_{limp_{p,max}} \cdot B_{imp_{p,t}} \quad (7)$$

$$0 \leq P_{lexp_{p,t}} \leq P_{lexp_{p,max}} \cdot B_{exp_{p,t}} \quad (8)$$

gdje su:

- $B_{imp_{p,t}}$ - binarna varijabla odluke za uvoz električne energije u vremenskom trenutku t ,
- $B_{exp_{p,t}}$ - binarna varijabla odluke za izvoz električne energije u vremenskom trenutku t ,
- $P_{imp_{p,max}}$ - maksimalna snaga prilikom uvoza električne energije iz mreže,
- $P_{exp_{p,max}}$ - maksimalna snaga prilikom izvoza električne energije u mrežu,
- $P_{limp_{p,max}}$ - maksimalna snaga prilikom uvoza električne energije s lokalnog tržišta,
- $P_{lexp_{p,max}}$ - maksimalna snaga prilikom izvoza električne energije na lokalno tržište.

Ograničenja snage prilikom punjenja i pražnjenja baterije električnog vozila definirana su izrazima (9) i (10):

$$0 \leq P_{chev_{p,ev,t}} \leq P_{chev_{p,ev,max}} \quad (9)$$

$$0 \leq P_{dchev_{p,t}} \leq P_{dchev_{p,ev,max}} \quad (10)$$

gdje su:

- $P_{chev_{p,ev,max}}$ - maksimalna snaga punjenja baterije električnog vozila,
- $P_{dchev_{p,ev,max}}$ - maksimalna snaga pražnjenja baterije električnog vozila.

Ograničenje stanja napunjenosti baterije električnog vozila definirano je izrazom (11):

$$SOC_{ev_{min}} \leq SOC_{ev_{p,ev,t}} \leq SOC_{ev_{max}} \quad (11)$$

gdje su:

- $SOC_{ev_{min}}$ - minimalno stanje napunjenosti baterije električnog vozila,
- $SOC_{ev_{max}}$ - maksimalno stanje napunjenosti baterije električnog vozila.

Ograničenje (12) osigurava da je sva električna energija izvezena na lokalno tržište od strane aktivnih kupaca koji imaju višak proizvedene energije jednaka ukupnoj uvezenoj energiji s lokalnog tržišta od strane aktivnih kupaca kojima je električna energija potrebna unutar energetske zajednice:

$$\sum_{p=1}^P \left(\frac{P_{imp_{p,t}}}{dt} \right) = \sum_{p=1}^P \left(\frac{P_{exp_{p,t}}}{dt} \right) \quad (12)$$

Procjena emisije prilikom uvoza električne energije iz mreže definirana je pomoću izraza (13):

$$CO_2 = CO_2^{int} \cdot \sum_{p=1}^P \left(\frac{P_{imp_{p,t}}}{dt} \right) \quad (13)$$

gdje je:

- CO_2^{int} - ugljični intenzitet prilikom proizvodnje električne energije koja odgovara uvezenoj električnoj energiji iz mreže.

Ograničenje istodobnog uvoza i izvoza električne energije definirano je izrazom (14):

$$B_{imp_{p,t}} + B_{exp_{p,t}} \leq 1 \quad (14)$$

Važno je napomenuti da se pojam dijeljenje električne energije odnosi na trgovanje električnom energijom putem lokalnog tržišta električne energije unutar energetske zajednice kao i između energetske zajednice. Također, kako se u radu nastoje provesti određene vrste simulacija, predloženi optimizacijski modela sustava za kratkoročno upravljanje energijom kao i ulazne podatke potrebno je prilagoditi simulacijskim scenarijima.

4. Simulacijski scenariji

U cilju razumijevanja dobiti koje energetske zajednice osiguravaju, u ovom radu provedena su tri simulacijska scenarija koja su opisana u nastavku.

Prvi simulacijski scenarij odnosi se na upravljanje električnom energijom komercijalne zgrade koja predstavlja jednog aktivnog kupca koji posjeduje fotonaponsku elektranu i punionice za električna vozila na parking. Funkcija cilja predloženog optimizacijskog modela minimizacija je troška rada, odnosno troška električne energije komercijalne zgrade.

Drugi simulacijski scenariji odnosi se na upravljanje električnom energijom unutar energetske zajednice građana. Energetska zajednica građana sastoji se od pet kućanstava i jedne komercijalne zgrade koji predstavljaju aktivne kupce, odnosno članove energetske zajednice. Funkcija cilja predloženog optimizacijskog modela minimizacija je troška rada, odnosno troška električne energije unutar energetske zajednice.

Treći simulacijski scenariji odnosi se na upravljanje električnom energijom više zajednica, odnosno šest energetskih zajednica koje mogu međusobno razmjenjivati električnu energiju putem lokalnog tržišta električne energije. Kao i u prethodnom simulacijskom scenariju, svaka od šest energetskih zajednica sastoji se od pet kućanstava i jedne komercijalne zgrade. Funkcija cilja predloženog optimizacijskog modela minimizacija je ukupnog troška rada energetskih zajednica građana.

U ovisnosti koji se simulacijski scenarij promatra, predloženi matematički model i ulazne podatke potrebno je prilagoditi promatranom scenariju.

Opis modela energetske zajednice

Kako je već prethodno spomenuto, svako kućanstvo posjeduje proizvodnju električne energije iz fotonaponske elektrane i električno vozilo. Nadalje, komercijalna zgrada koja se nalazi unutar energetske zajednice posjeduje fotonaponsku elektranu i punionice na parking u zgrade za potrebe punjenja električnih vozila svojih djelatnika.

U prvom simulacijskom scenariju za aktivnog kupaca, odnosno komercijalnu zgradu koja samostalno djeluje na tržištu, uzimajući u obzir proizvodnju i potrošnju električne energije te električna vozila spojena na punionice, nastoji se predloženim optimizacijskim modelom minimizirati trošak rada promatrane zgrade. Nadalje, kako bi rezultati bili usporedivi s ostalim simulacijskim scenarijima, u ovom simulacijskom scenariju nadomještaju se pojedina stanja napunjenosti baterija električnih vozila s ukupnim stanjem napunjenosti baterija električnih vozila koje je jednako ukupnom kapacitetu pet električnih vozila, odnosno nazivnog iznosa 320 kWh. Instalirana snaga fotonaponske elektrane komercijalne zgrade iznosi 125 kW. Na slici 3 su prikazani profili potrošnje i proizvodnje električne energije komercijalne zgrade.

U drugom simulacijskom scenariju komercijalna zgrada djeluje unutar energetske zajednice te osim ovisnosti o cijenama električne energije od strane opskrbljivača, može dijeliti, odnosno razmjenjivati električnu energiju na lokalnom tržištu s ostalim aktivnim kupcima. Ostali aktivni kupci su kućanstva s instaliranim fotonaponskim elektranama i električnim vozilima. Svako kućanstvo posjeduje jedno električno vozilo koje može puniti unutar kućne instalacije te na punionicama komercijalne zgrade. U ovom simulacijskom scenariju otvara se mogućnost za dodatno smanjenje troška rada komercijalne zgrade optimalnim planiranjem razmjene električne energije između kućanstava i električnih vozila. Na slikama 1, 2 i 3 prikazani su profili proizvodnje i potrošnje električne energije aktivnih kupaca unutar energetske zajednice. P1, P3, P4, P5 i P6 su kućanstva s instaliranim

snagama fotonaponskih elektrana 5 kW, dok je aktivni kupac označen s P2 komercijalna zgrada s instaliranom snagom fotonaponske elektrane 125 kW. U ovom simulacijskom scenariju, osim prednosti koja proizlazi iz energetske zajednice, a to je dijeljenje energije, jasno se može zaključiti i o prednostima koje električna vozila osiguravaju velikim kapacitetima baterija i snagama punjenja odnosno pražnjenja.

Prilikom obrade ulaznih podataka i razvijanja detaljnog optimizacijskog modela upravljanja energijom unutar energetske zajednice, odnosno za potrebe provođenja drugog simulacijskog scenarija u obzir se uzima prosječna upotreba električnog vozila. Prema provedenom pilot upitniku (2023.), odabrane su udaljenosti koje vlasnici električnih vozila prosječno prelaze tijekom dana, a ona iznose za 30 km za P1, 35 km za P3, 40 km za P4, 100 km za P5 i 90 km za P6. Na osnovu definiranih udaljenosti, pretpostavljena su vremena korištenja električnih vozila. Ulazni podaci potrebni za rješavanje optimizacijskog modela prikazani su u Tablici 1.

U trećem simulacijskom scenariju nastoje se pokazati prednosti udruživanja više energetske zajednice aktivnih kupaca, odnosno njih šest. Prednosti koje proizlaze udruživanjem energetske zajednice su prvenstveno niži troškovi korištenja električne energije te emisija. Navedeno proizlazi iz mogućnosti boljeg iskorištavanja električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora energije što je omogućeno dijeljenjem električne energije između energetske zajednice. Nadalje, potrebni ulazni profili proizvodnje i potrošnje električne energije dobiveni su na osnovu rezultata optimizacijskog modela primijenjenog u drugom simulacijskom scenariju, uzimajući u obzir optimalne snage punjenja i pražnjenja baterija električnih vozila te pojedinačne profile proizvodnje i potrošnje električne energije aktivnih kupaca. S obzirom da se radi o optimalnim iznosima varijabli odluka iz drugog simulacijskog scenarija, energetske zajednice su u energetske ravnoteži, odnosno potražnja za električnom energijom je zadovoljena. Kako bi se osiguralo dijeljenje električne energije između zajednica, uvodi se neravnoteža između potrošnje i proizvodnje električne energije unutar energetske zajednice, što dovodi do dijeljenja električne energije između zajednica putem lokalnog tržišta električne energije. Navedeni pristup se koristi u cilju usporedbe dobivenih rezultata s prethodnim simulacijskim scenarijima.

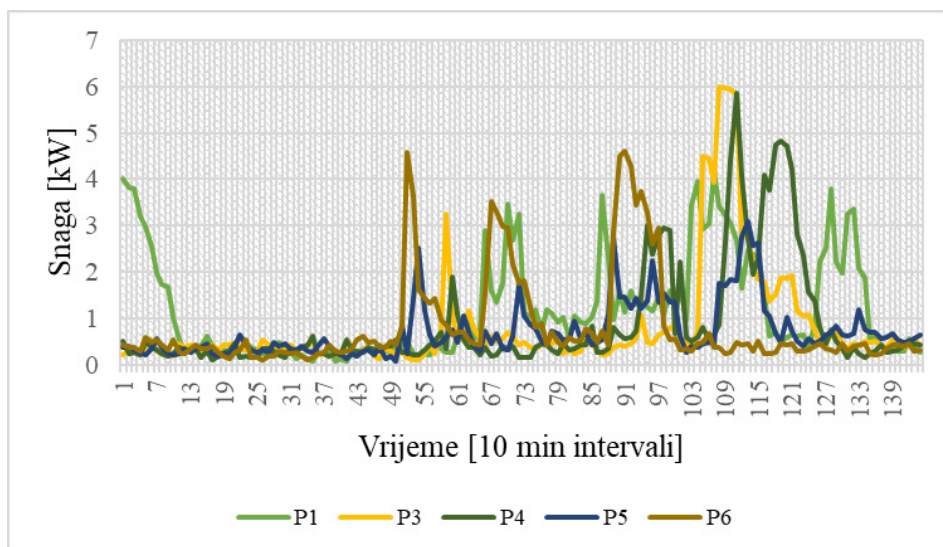
Cijene električne energije, prilikom preuzimanja električne energije iz mreže, preuzete su od opskrbljivača električne energije u Republici Hrvatskoj, odnosno Hrvatske Elektroprivrede (HEP d. d.). Prema Bijelom tarifnom modelu za kućanstva, cijena električne energije u nižoj tarifi iznosi 0,09 €/kWh, dok u višoj tarifi iznosi 0,146 €/kWh (Tarifne stavke- kućanstvo, 2024). Nadalje, za komercijalnu zgradu cijena električne u nižoj tarifi iznosi 0,159 €/kWh, dok u višoj tarifi iznosi 0,283 €/kWh (Tarifne stavke- poduzetništvo, 2024). Prilikom određivanja cijena električne energije u obzir su uzete naknade za korištenje prijenosne i distribucijske mreže, naknada za poticanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije te PDV.

Cijene električne energije, prilikom predaje električne energije u mrežu, definirane su prema trenutnom tržišnom modelu „Kupca s vlastitom proizvodnjom“ za kućanstva i poduzetništvo. Prema navedenom tržišnom modelu, cijena električne energije jednaka je prosječnoj cijeni ukupno kupljene električne energije od opskrbljivača u promatranom obračunskom razdoblju, bez naknada za korištenje prijenosne i distribucijske mreže te PDV-a, pomnožene s koeficijentom 0,9 i vrijedi u slučaju da je više električne energije kupljeno od opskrbljivača nego što je prodano opskrbljivaču. U slučaju da navedeni uvjet nije zadovoljen, cijena električne energije se dodatno umanjuje, odnosno množi se dodatno s omjerom uvezene i izvezene električne energije u mrežu. Na osnovu navedenog, cijena električne energije iznosi 0,055 €/kWh uz pretpostavku da su jednake količine električne energije uvezene iz mreže tijekom visoke i niske tarife i da je zadovoljen prethodno spomenuti uvjet u promatranom obračunskom razdoblju (Tržišni model kućanstvo – Kupac s vlastitom potrošnjom, 2024). Cijena električne energije za komercijalnu zgradu jednaka je cijeni energije u jedinstvenoj dnevnoj tarifi za univerzalnu opskrbu električnom energijom (kućanstvo), tarifni model Plavi bez naknada za korištenje prijenosne i distribucijske mreže te PDV-a, pomnožene s koeficijentom 0,5 te iznosi 0,035 €/kWh (Tržišni model poduzetništvo – Kupac s vlastitom potrošnjom, 2024).

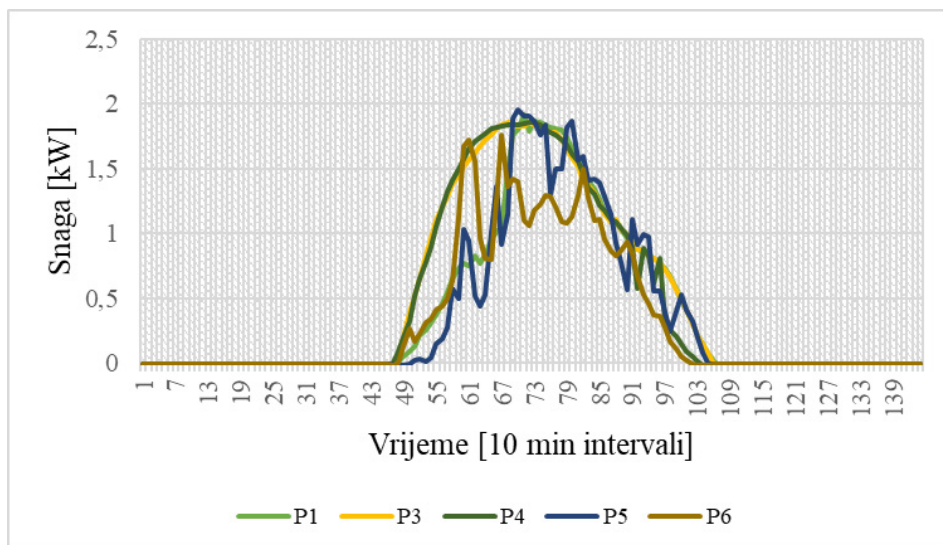
Cijena dijeljenja električne energije unutar energetske zajednice putem lokalnog tržišta jednaka je prosječnoj naknadi za korištenje mreže kućanstva jer je nepovoljniji slučaj u odnosu na poduzetništvo te se pretpostavlja da je tako definirana cijena dovoljna za pokrivanje naknade za korištenje mreže. Cijena dijeljenja električne energije, na prethodno opisan način, iznosi 0,025 €/kWh (Tarifne stavke za distribuciju električne energije – kućanstvo, 2024).

Optimizacijski model sustava za upravljanje energijom aktivnog kupca odnosno energetske zajednice razvijen je pomoću mješovitog cjelobrojnog linearnog programiranja u GAMS programskom okruženju te je LINDO *solver* korišten za rješavanje optimizacijskog problema. Horizont planiranja je 24 sata u budućnost s vremenskim korakom od 10 minuta s obzirom na ulazne podatke, odnosno profile proizvodnje i potrošnje električne energije koji su dobiveni mjerenjem u cilju osiguravanja kvalitete rezultata optimizacije. Prema normi HRN EN 50160 vremenski period mjerenja je sedam dana u 10 minutnim vremenskim intervalima.

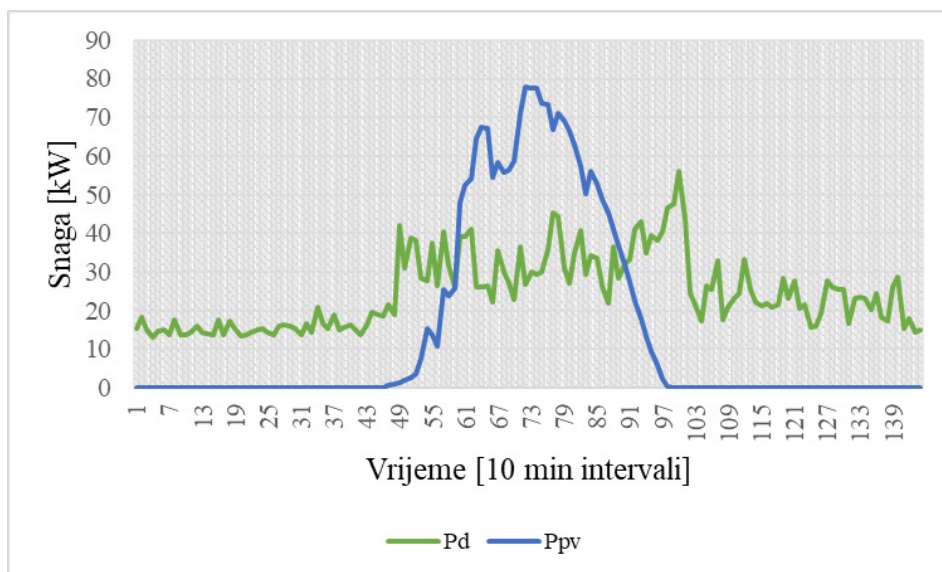
Slika 1: Profili potrošnje električne energije aktivnih kupaca (kućanstva) unutar energetske zajednice



Slika 2: Profili proizvodnje električne energije iz fotonaponskih elektrana aktivnih kupaca (kućanstva) unutar energetske zajednice



Slika 3: *Profili potrošnje i proizvodnje električne energije komercijalne zgrade (aktivni kupac P2)*



Tablica 1: *Ulazni podaci optimizacijskog modela*

$P_{imp, p, max}$	13,8 kW/120 kW
$P_{exp, p, max}$	5 kW/120 kW
$Pl_{imp, p, max}$	13,8 kW/120 kW
$Pl_{exp, p, max}$	5 kW/120 kW
$P_{chev, p, ev, max}$	7,4 kW
$Pd_{chev, p, ev, max}$	7,4 kW
η_{ch}	0,985
η_{dch}	0,985
Nazivni kapacitet baterije električnog vozila	64 kWh
Potrošnja električne energije električnog vozila	0,175 kWh/km
CO_2 intensity	0,246 kg/kWh

5. Rezultati

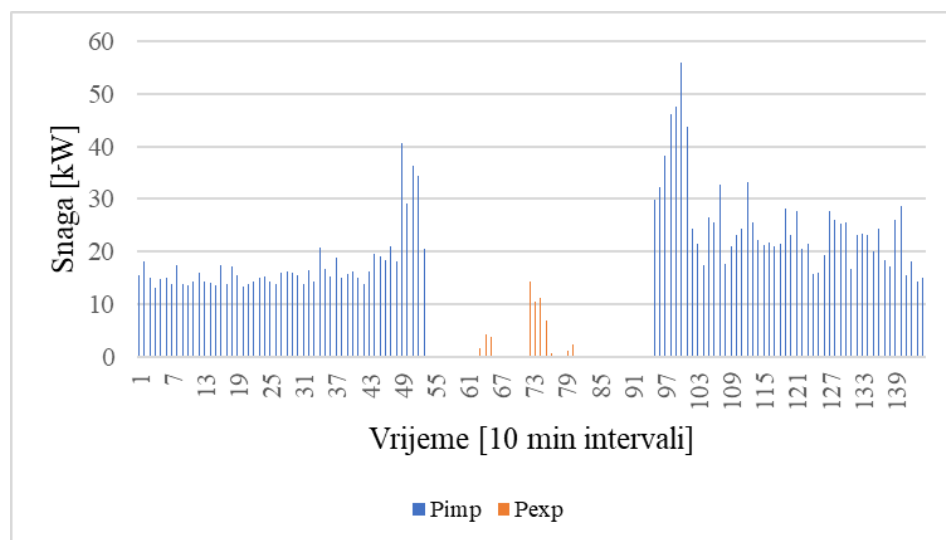
U ovom poglavlju prikazat će se rezultati dobiveni predloženim optimizacijskim modelom sustava za kratkoročno upravljanje energijom aktivnog kupca odnosno unutar energetske zajednice za prethodno navedene i opisane simulacijske scenarije.

Prvi simulacijski scenarij – upravljanje električnom energijom komercijalne zgrade koja predstavlja aktivnog kupca koji samostalno djeluje na tržištu

Na slikama 4, 5 i 6 prikazani su rezultati dobiveni predloženim optimizacijskim modelom upravljanja energijom aktivnog kupca.

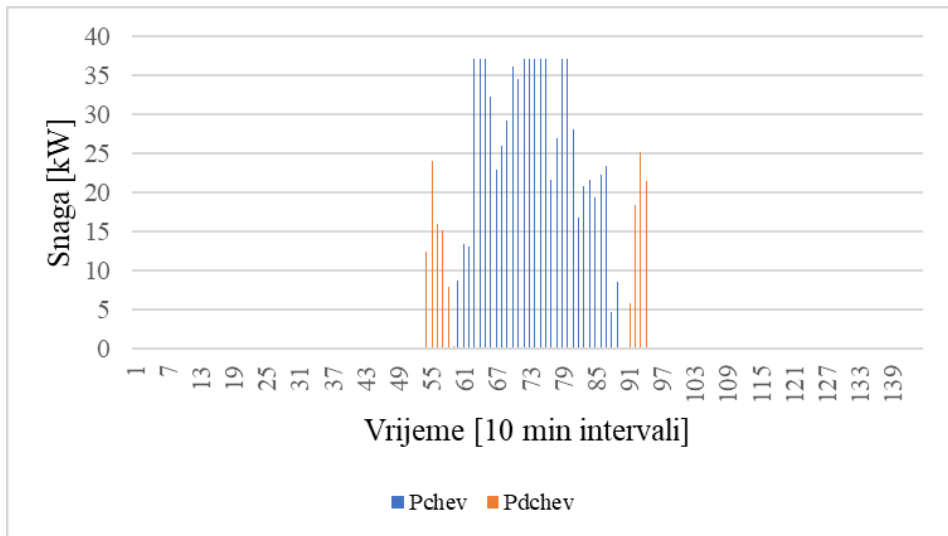
Na slici 4 prikazane su angažirane snage prilikom uvoza i izvoza električne energije iz mreže te prilikom izvoza električne energije u mrežu. Može se primijetiti da sustav upravljanja energijom mora osigurati potrebnu električnu energiju iz mreže za pokrivanje vlastite potrošnje zgrade u slučaju kada nema proizvodnje ili u slučaju niske proizvodnje električne energije iz fotonaponske elektrane. Nadalje, može se primijetiti da sustav upravljanja energijom zgrade nastoji iskoristiti svu proizvedenu električnu energiju iz fotonaponske elektrane za vlastite potrebe i potrebe punjenja baterija električnih vozila. Navedeno proizlazi iz iznosa cijena električne energije jer je cijena za prodaju električne energije u mrežu znatno niža od cijene za kupnju električne energije iz mreže.

Slika 4: Angažirane snage prilikom uvoza i izvoza električne energije iz mreže od strane komercijalne zgrade



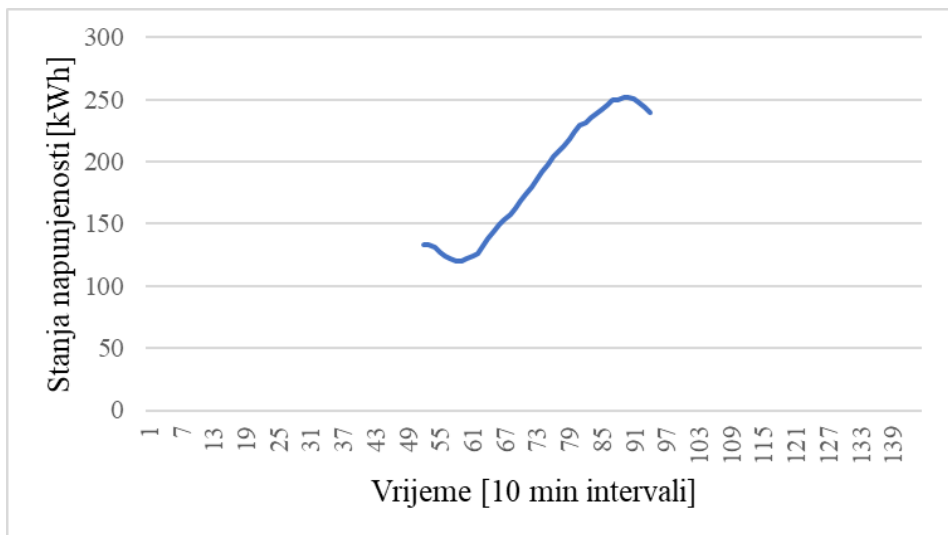
Slika 5 prikazuje angažirane snage prilikom punjenja i pražnjenja baterija električnih vozila spojenih na punionice komercijalne zgrade. Analizom rezultata može se primijetiti da sustav upravljanja energijom zgrade nastoji pokriti vlastite potrebe za električnom energijom iz baterija električnih vozila u slučaju niske proizvodnje električne energije iz fotonaponske elektrane. S druge strane, viškovima proizvedene električne energije nastoji puniti baterije električnog vozila zbog već gore spomenutih razloga što se tiču cijena električne energije. Samo viškovi električne energije koji se opravdano ne mogu iskoristiti ni za pokrivanje vlastite potrošnje komercijalne zgrade ni za punjenje baterija električnog vozila izvoze se u mrežu. Ako bi se koristile punionice većih snaga, pretpostavlja se da bi se iznos izvezeno električne energije u mrežu smanjio.

Slika 5: Angažirane snage prilikom punjenja i pražnjenja baterija električnih vozila spojenih na punionice komercijalne zgrade



Slika 6 prikazuje ukupno stanje napunjenosti baterija električnih vozila spojenih na punionice komercijalne zgrade. Analizom rezultata može se zaključiti da ukupno stanje napunjenosti prati angažirane snage prilikom punjenja i pražnjenja baterija električnih vozila. Ukupno stanje napunjenosti se kreće od minimalnih 120,3 kWh do maksimalnih 251,62 kWh jer se radi o ukupno pet električnih vozila.

Slika 6: Ukupno stanje napunjenosti baterija električnih vozila spojenih na punionice komercijalne zgrade



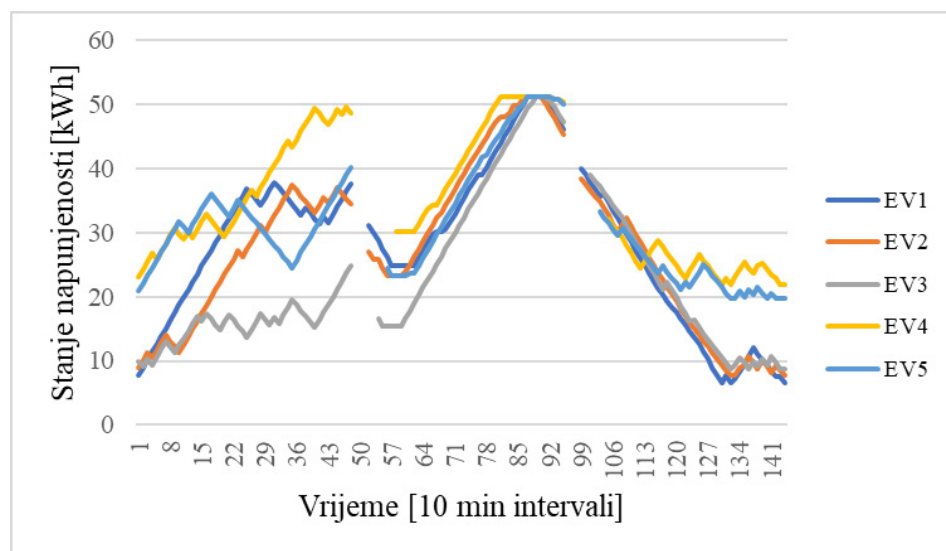
Drugi simulacijski scenariji – upravljanje električnom energijom unutar energetske zajednice koja se sastoji od kućanstava i komercijalne zgrade

Rezultati dobiveni predloženim optimizacijskim modelom upravljanja energijom unutar energetske zajednice prikazani su na slici 7. Na slici 7 prikazana su pojedinačna stanja napunjenosti baterija električnih vozila. Kako se u ovom simulacijskom scenariju uzima u obzir upravljanje energijom unutar energetske zajednice koja se sastoji od šest aktivnih kupaca, na slici 7 prikazana su pojedinačna stanja napunjenosti kroz cijeli vremenski horizont planiranja, odnosno 24 sata.

Analizom rezultata može se primijetiti, kada su električna vozila spojena na punionice u kućanstvima, da dolazi do stalnog punjenja i pražnjenja baterije električnog vozila. Navedeno se događa iz razloga jer sustav upravljanja energijom nastoji minimizirati ukupni trošak rada energetske zajednice, a to osigurava punjenjem baterije električnog vozila u niskoj tarifi kućanstva te pražnjenjem baterije električnog vozila dijeljenjem električne energije unutar zajednice, prvenstveno komercijalnoj zgradi. Opisanim načinom sustav upravljanja energijom minimizira trošak električne energije zgrade jer su cijene električne energije industrijskih potrošača veće u usporedbi s kućanstvima.

Iz rezultata se može primijetiti sličan obrazac stanja napunjenosti baterija električnih vozila (prvi simulacijski scenarij) dok su spojeni na punionice komercijalne zgrade. Navedeno proizlazi iz razloga već opisanih prilikom obrade prvog simulacijskog scenarija.

Slika 7: Pojedinačna stanja napunjenosti baterija električnih vozila unutar energetske zajednice



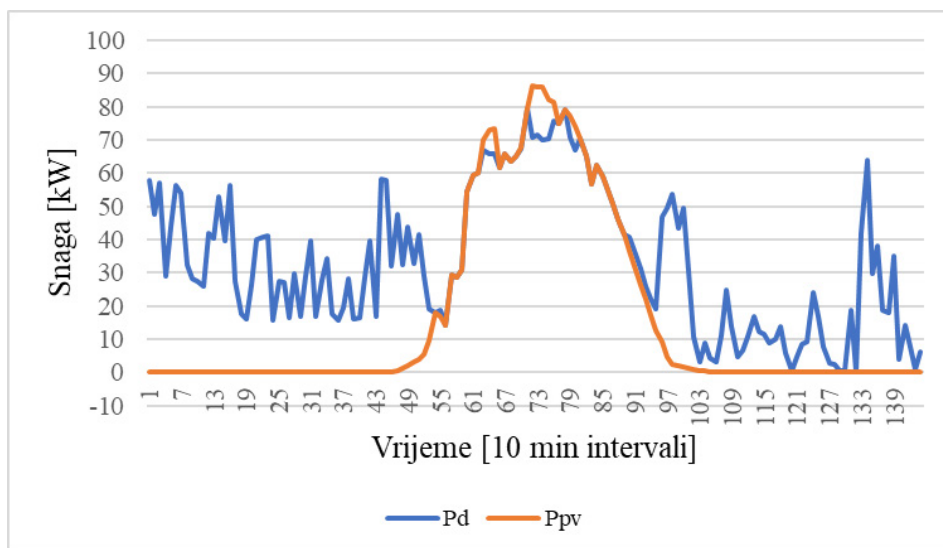
Treći slučaj – upravljanje električnom energijom između energetske zajednice građana

Na slikama 8 i 9 prikazani su rezultati dobiveni predloženim optimizacijskim modelom upravljanja energijom između energetske zajednice.

Na slici 8 prikazani su ulazni podaci, odnosno profili potrošnje i proizvodnje električne energije dobiveni na osnovu rezultata iz drugog simulacijskog scenarija. Profil potrošnje električne energije jednak je sumi pojedinačnih profila potrošnje električne energije aktivnih kupaca energetske zajednice i angažiranih snaga prilikom punjenja i pražnjenja baterija električnih vozila. S druge strane, profil proizvodnje električne energije jednak je sumi profila pojedinačne proizvodnje električne energije iz fotonaponskih elektrana aktivnih kupaca.

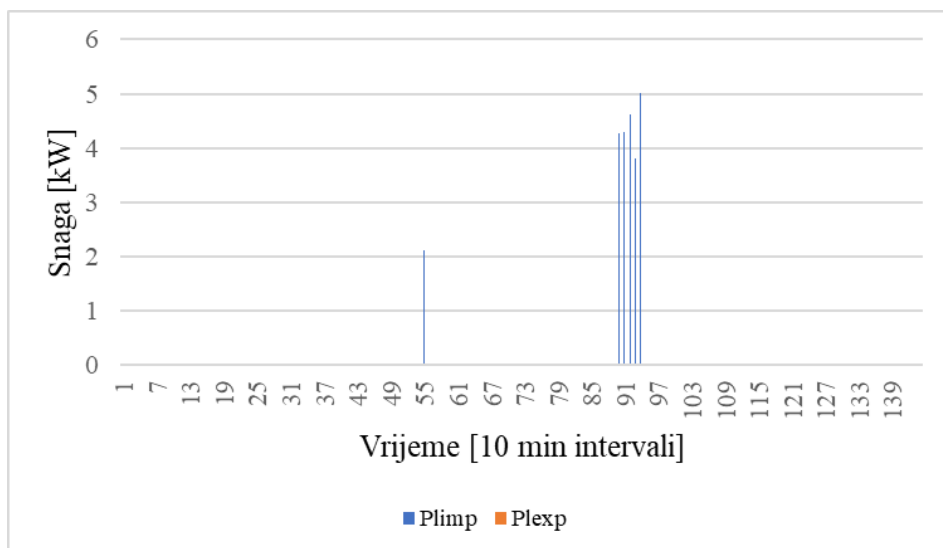
Kako su profili potrošnje i proizvodnje električne energije dobiveni na osnovu rezultata optimizacijskog modela iz prethodnog simulacijskog scenarija, može se zaključiti da je energetska ravnoteža unutar energetske zajednice postignuta, odnosno da neće dolaziti do dijeljenja energije između energetske zajednice. U cilju osiguravanja dijeljenja električne energije između zajednica, uvodi se neravnoteža između potrošnje i proizvodnje električne energije unutar energetske zajednice. Neravnoteža se osigurava množenjem profila proizvodnje električne energije s faktorom skaliranja koji je jednak rednom broju energetske zajednice pomnožen s koeficijentom koji iznosi $1/3$. Na ovaj način se osigurava da određene energetske zajednice imaju manju proizvodnju električne energije iz fotonaponske elektrane, neke više, a postoji energetska zajednica s jednakim profilima potrošnje i proizvodnje električne energije, odnosno energetskom ravnotežom. Navedena energetska zajednica je referentna za usporedbu dobivenih rezultata s prethodnim simulacijskim scenarijima.

Slika 8: Profili potrošnje i proizvodnje električne energije dobiveni na osnovu rezultata iz drugog simulacijskog scenarija



Slika 9 prikazuje angažirane snage prilikom trgovanja električnom energijom između energetske zajednice, odnosno putem lokalnog tržišta električne energije. Zbog osiguravanja energetske neravnoteže, analizom rezultata može se primijetiti da dolazi do trgovanja električnom energijom između zajednica. Trgovanje električnom energijom između energetske zajednice odvija se u trenucima kada postoji određena proizvodnja električne energije iz fotonaponskih elektrana, odnosno trguje se viškovima električne energije.

Slika 9: Angažirane snage prilikom trgovanja električnom energijom između energetske zajednice



Usporedba simulacijskih scenarija

U tablici 2 prikazani su rezultati promatranih simulacijskih scenarija dobiveni predloženim optimizacijskim modelima upravljanja energijom.

Analizom rezultata prikazanih u tablici 2, za prvi i drugi simulacijski scenarij i bez mogućnosti dijeljenja električne energije putem lokalnog tržišta električne energije može se zaključiti da su troškovi kao i emisije približno istog iznosa. Navedeno proizlazi iz razloga prethodno opisanih, odnosno da su ulazni podaci obrađeni u cilju osiguravanja mogućnosti što bolje usporedbe dobivenih rezultata.

U slučaju omogućavanja dijeljenja električne energije unutar energetske zajednice, trošak u drugom slučaju se znatno smanjuje, odnosno 36,38% uz istovremeno smanjenje emisija za 56,82%. Do smanjenja troška za električnu energiju komercijalne zgrade i ukupnih emisija dolazi iz opravdanog razloga, odnosno članovima energetske zajednice povoljnije je razmjenjivati električnu energiju unutar zajednice između članova.

U trećem slučaju, uz omogućavanje dijeljenja energije između energetske zajednice na prethodno opisan način, odnosno putem lokalnog tržišta električne energije, može se primijetiti da dolazi do smanjenja troška rada za 8,98% i ukupnih emisija za približno 1%.

Tablica 2: *Usporedba troškova i emisija za aktivnog kupca P2*

		Trošak aktivnog kupca (zgrade) [EUR]	Ukupni trošak energetske zajednice [EUR]	Emisija aktivnog kupca (zgrade) [kg]	Ukupna emisija CO2 energetske zajednice [kg]
Prvi slučaj		81,41	-	88,98	-
Drugi slučaj	Bez lokalnog tržišta električne energije	78,70	86,97	86,63	112,23
	S lokalnim tržištem električne energije	50,07	65,68	37,41	105,95
Treći slučaj		-	59,79	-	104,96

6. Zaključak

U cilju osiguravanja ušteda, kupci električne energije s integriranom elektranom na obnovljive izvore energije, odnosno aktivni kupci moraju posjedovati sustav upravljanja energijom. Navedeno proizlazi iz toga što je proizvodnja električne energije iz elektrana na obnovljive izvore energije uglavnom nepredvidljiva i uzrokuje poteškoće u planiranju pogona elektroenergetskog sustava aktivnog kupca. S druge strane, pametno upravljanje električnim uređajima u kućanstvu uz zadržavanje određene razine komfora korisnika kućanstva predstavlja izazov. Nadalje, unutar elektroenergetskog sustava aktivnog kupca u svrhu najmanjih troškova, u svakom trenutku mora biti zadovoljena jednadžba balansa energije, odnosno proizvodnja električne energije iz elektrana na obnovljive izvore energije mora biti jednaka potrošnji električne energije kućanstva, što također predstavlja izazov. Rješenje za navedene probleme, uz razvoj sustava upravljanja energijom, treba osigurati veću fleksibilnost pogona elektroenergetskog sustava aktivnog kupca. Veća fleksibilnost u radu elektroenergetskog sustava aktivnog kupca može se postići ugradnjom stacionarnih sustava za skladištenje energije ili uporabom baterije električnog vozila. Integracija električnog vozila predstavlja povoljniju opciju u odnosu na integraciju stacionarnih sustava za skladištenje energije s obzirom na investicijske troškove i mogućnost dodatnog korištenja električnih vozila za prijevoz. Optimizacija rada elektroenergetskog sustava aktivnog kupca s integriranim električnim vozilom pomaže smanjenju troškova uz zadržavanje zadovoljavajuće razine udobnosti korisnika kućanstva. Također, optimizacija smanjuje neizvjesnost u predviđanju proizvodnje energije iz elektrana na obnovljive izvore energije u vlasništvu aktivnog kupca, kao i u predviđanju potrošnje energije, odnosno omogućuje pametno upravljanje električnim uređajima u kućanstvu.

Dodatno, aktivni kupci mogu smanjiti svoje troškove osnivanjem energetske zajednice, što je novi koncept koji potiče suradnju i zajedničko korištenje energetske usluge poput proizvodnje, potrošnje i pohrane energije. Energetske zajednice osim financijske koristi,

također promiču ekološke i socijalne prednosti za svoje članove i/ili lokalna područja na kojima zajednica djeluje. Prema hrvatskom zakonodavstvu postoje dvije vrste energetske zajednice: energetske zajednice građana i zajednice obnovljivih izvora energije. Zajednice obnovljivih izvora energije su usmjerene na lokalnu proizvodnju i korištenje obnovljivih izvora energije, dok energetske zajednice građana nastoje proširiti djelovanje na tržištu električne energije i pružiti širi spektar usluga.

U ovom radu analizira se optimalno upravljanje energetskim sustavom aktivnog kupca koji posjeduje električno vozilo i fotonaponsku elektranu, s ciljem smanjenja mjesečnih troškova za električnu energiju. Također, razmatra se korist formiranja energetske zajednice i mogućnosti razmjene električne energije unutar zajednice. Proučava se i korist od osnivanja lokalnog tržišta električne energije gdje bi energetske zajednice mogle međusobno trgovati električnom energijom, kao i njihov utjecaj na smanjenje ugljičnog otiska aktivnih kupaca. Na osnovu navedenog, u radu je razvijen optimizacijski model sustava za kratkoročno upravljanje energijom aktivnog kupca unutar energetske zajednice. Optimizacijski model razvijen je pomoću mješovitog cjelobrojnog linearnog programiranja u GAMS programskom okruženju te optimizacijski problem riješen primjenom LINDO *solvera*. Optimizacijski okvir predloženog optimizacijskog modela sastoji se od horizonta planira od 24 sata u budućnost s vremenskim korakom od 10 minuta u cilju osiguravanja kvalitete rezultata optimizacije. Ulazni profili proizvodnje električne energije iz fotonaponskih elektrana i potrošnje električne energije dobiveni su sedmodnevnim mjerenjima u 10 minutnim vremenskim intervalima na energetskim sustavima aktivnih kupaca, prema normi HRN EN 50160.

Predložen optimizacijski model primijenjen je na tri scenarija. U prvom scenariju, fokus je na komercijalnoj zgradi koja predstavlja aktivnog kupca te samostalno djeluje na tržištu i minimizira svoje troškove električne energije. Optimizacijski model uzima u obzir proizvodnju i potrošnju električne energije, kao i električna vozila spojena na punionice. Drugi scenarij analizira djelovanje komercijalne zgrade unutar energetske zajednice. U ovom scenariju, osim ovisnosti o cijenama električne energije od strane opskrbljivača, komercijalna zgrada može dijeliti i razmjenjivati električnu energiju s ostalim aktivnim kupcima, odnosno kućanstvima s fotonaponskim elektranama i električnim vozilima. Svako kućanstvo posjeduje jedno električno vozilo koje se može puniti unutar kućanstva ili na punionicama komercijalne zgrade. Optimizacijom razmjene energije između kućanstava, električnih vozila i komercijalne zgrade omogućava se dodatno smanjenje troškova za električnu energiju komercijalne zgrade. Treći scenarij istražuje prednosti udruživanja više energetske zajednice aktivnih kupaca. Udruživanjem energetske zajednice postižu se niži troškovi korištenja električne energije i smanjenje ukupnih emisija CO₂. Navedeno proizlazi iz boljeg iskorištavanja električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora energije, odnosno fotonaponskih elektrana jer je omogućeno dijeljenje električne energije između zajednica putem lokalnog tržišta električne energije.

Rezultati dobiveni predloženim optimizacijskim modelom sustava upravljanja energijom aktivnog kupca unutar energetske zajednice pokazuju smanjenje troška za 36,38% i emisija CO₂ za 56,82% između prvog i drugog scenarija. Nadalje, smanjenje troška između drugog i trećeg scenarija iznosi 8,98% uz smanjenje ukupnih emisija CO₂ za približno 1%.

Na osnovu dobivenih rezultata i provedene analize, može se zaključiti da energetske zajednice predstavljaju obećavajući koncept za promjene u energetske sektoru, potičući nove dizajne tržišta, decentraliziranu i održivu proizvodnju energije kao i upotrebu električnih vozila. Također, može se zaključiti, kako svijet prelazi na čišća i otpornija energetska rješenja, uloga električnih vozila nadilazi osnovnu funkciju prijevoza, postajući ključni element za pohranu energije u u daljnjem razvoju elektroenergetskog sustava..

Zahvala

Ovaj rad podupire Hrvatska zaklada za znanost (HRZZ) u sklopu projekta „Distribucijska elektroenergetska mreža s velikim udjelom aktivnih kupaca“ (broj projekta: UIP-2020-02-5796).

Literatura

2050 long-term strategy. Preuzeto s https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_en, pristupljeno: ožujak 2020.

Al-Sorour, A., Fazeli, M., Monfared, M. i Fahmy, A. A. (2023). Investigation of Electric Vehicles Contributions in an Optimized Peer-to-Peer Energy Trading System. *IEEE Access*, 11, 12489–12503. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3242052

Climate Action: 2030 climate & energy framework. Preuzeto s https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en, pristupljeno 23. 10. 2024.

Directive (EU) 2019/944 on common rules for the internal market for electricity. Preuzeto s <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/LSU/?uri=CELEX:32019L0944>, pristupljeno 5. 6. 2019.

Faia, R., Soares, J., Vale, Z. i Corchado, J. M. (2021). An optimization model for energy community costs minimization considering a local electricity market between prosumers and electric vehicles. *Electron.*, 10(2), 1–17. DOI: 10.3390/electronics10020129

Hou, X., Wang, J., Huang, T., Wang, T. i Wang, P. (2019). Smart Home Energy Management Optimization Method Considering Energy Storage and Electric Vehicle. *IEEE Access*, (7), 144010–144020. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2944878



Lokeshgupta, B. i Sivasubramani, S. (2018). Multi-objective home energy management with battery energy storage systems. *Sustain. Cities Soc.*, (47), 101458, DOI: 10.1016/j.scs.2019.101458

Mišljenović, N., Žnidarec, M., Knežević, G., Šljivac, D. i Sumper, A. (2023). A Review of Energy Management Systems and Organizational Structures of Prosumers. *Energies*, 16(7), 3179. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16073179>

Mišljenović, N., Knežević, G., Žnidarec, M. i Topic, D. (2022). Optimal utilization of stationary battery storage and electric vehicle in a prosumer power system. *Int. Conf. Eur. Energy Mark. EEM*, 1–6. DOI: 10.1109/EEM54602.2022.9921166

Mišljenović, N., Knežević, G. i Pleskalt, M. (2023). Optimal utilization of electric vehicles in the parking lot of the faculty building to increase social welfare. *2023 IEEE 6th Int. Conf. Work. Óbuda Electr. Power Eng.*, 101–106. DOI: 10.1109/CANDO-EPE60507.2023.10418005

Mišljenović, N., Knežević, G., Žnidarec, M. i Topić, D. (2024). Optimal State of Charge Control of EV Batteries within Energy Community Considering Cost Minimization and Environmental Impact. *2024 20th Int. Conf. Eur. Energy Mark. EEM*, 1-6. DOI: 10.1109/EEM60825.2024.10608901

Mišljenović, N., Knežević, G., Topić, D. i Žnidarec, M., (1. ožujka 2023). Pilot anketni upitnik istraživanja o navikama i razini željenog komfora korisnika električnih vozila. *Google Forms*

Saif, A., Khadem, S. K., Conlon, M. F. i Norton, B. (2023). Impact of Distributed Energy Resources in Smart Homes and Community-Based Electricity Market. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 59(1), 59–69. DOI: 10.1109/TIA.2022.3202756

Tarifne stavke- kućanstvo. Preuzeto s <https://www.hep.hr/elektra/kucanstvo/tarifne-stavke-cijene/1547>, pristupljeno 1. 2. 2024.

Tarifne stavke- poduzetništvo. Preuzeto s <https://www.hep.hr/elektra/poduzetnistvo/tarifne-stavke-cijene-1578/1578>, pristupljeno 1. 2. 2024.

Tržišni model poduzetništvo - Kupac s vlastitom potrošnjom. Preuzeto s <https://www.hep.hr/elektra/poduzetnistvo/zajamceni-otkup-elektricne-energije-kategorija-poduzetnistvo/1647>, pristupljeno 1. 2. 2024.

Tržišni model kućanstvo - Kupac s vlastitom potrošnjom. Preuzeto s <https://www.hep.hr/elektra/kucanstvo/kupac-s-vlastitom-proizvodnjom-kategorija-kucanstvo/1545>, pristupljeno 1. 2. 2024.

Tarifne stavke za distribuciju električne energije - kućanstvo. Preuzeto s <https://www.hep.hr/ods/kupci/kucanstvo/tarifne-stavke-cijene/160>, pristupljeno 1. 2. 2024.

Zakon o tržištu električne energije. Preuzeto s <https://www.zakon.hr/z/377/Zakon-o-tržištu-električne-energije>, pristupljeno 6. 10. 2021.

Zhong, Q. W., Buckley, S., Vassallo, A. i Sun, Y. Z. (2018). Energy cost minimization through optimization of EV, home and workplace battery storage. *Sci. China Technol. Sci.*, 61(5), 761–773. DOI: 10.1007/s11431-017-9188-y

ENERGY COMMUNITIES AND ENERGY SHARING

Goran KNEŽEVIĆ

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek, Kneza Trpimira 2b, Osijek, Croatia
goran.knezevic@ferit.hr

Danijel TOPIĆ

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek, Kneza Trpimira 2b, Osijek, Croatia
danijel.topic@ferit.hr

Nemanja MIŠLJENOVIC

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek, Kneza Trpimira 2b, Osijek, Croatia
nemanja.misljenovic@ferit.hr

Abstract

Previous passive electricity consumers by the integration of renewable energy sources (RES) in their possession are becoming consumers with their own generation, or so-called prosumers. The electricity generation from most RES based power plants is generally variable and causes difficulties in planning the operation of the prosumer power system. Greater flexibility can be achieved by adding a stationary electricity storage system or using an electric vehicle battery. Optimizing the operation of the prosumer energy system with the integration of the electric vehicle as controllable element aims to reduce the costs of the active customer while maintaining a satisfactory level of comfort. In addition, it reduces the uncertainty of forecasting the production of electricity from the RES based power plant owned by the prosumer and forecasting the consumption of the power system of the prosumer. Prosumers can achieve an additional opportunity to reduce costs by establishing energy communities, which represent a new concept that encourages prosumers to cooperate, thus enabling the joint use of energy services such as energy generation, consumption and storage. In addition to financial gain, the goals of establishing energy communities are also environmental and social benefits for community members or local areas where the community operates. The Croatian legislation defines two basic types of energy communities: energy communities of citizens (EZG) and communities of renewable energy sources (ZOIE). ZOIE focuses on the expansion and local use of renewable sources of electricity and heat, while EZG focuses on establishing a new participant in the electricity market and providing a wider range of services compared to ZOIE. This paper analyzes the optimal management of the energy system of a prosumer who owns an electric vehicle and a photovoltaic power plant with the aim of minimizing the cost of the prosumer regarding to monthly electricity bill.

Also, the welfare of the prosumer is considered in the case of the formation of an energy community and the exchange of energy within the community. In addition, the benefit of forming a local market where several energy communities can trade electricity with each other is analyzed. Furthermore, the influence of energy communities on the carbon footprint of a prosumer is analyzed.

Key words: prosumers, energy communities, energy sharing, optimal energy system management, carbon footprint

Key message of the paper: The paper analyzes the optimal management of the energy system of a prosumer who owns an electric vehicle and a photovoltaic power plant to minimize the cost of paying the monthly electricity bill. It also considers the prosumer's welfare in forming an energy community and exchanging energy within the community.